

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-83888

(P2003-83888A)

(43)公開日 平成15年3月19日(2003.3.19)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テマコード(参考)

G 0 1 N 21/35

G 0 1 N 21/35

Z 2 G 0 2 0

G 0 1 J 3/28

G 0 1 J 3/28

2 G 0 5 9

G 0 1 N 22/00

G 0 1 N 22/00

M 2 G 0 6 5

H 0 1 S 1/02

H 0 1 S 1/02

// G 0 1 J 11/00

G 0 1 J 11/00

審査請求 有 請求項の数10 O L (全 10 頁)

(21)出願番号

特願2001-274318(P2001-274318)

(71)出願人 301022471

独立行政法人通信総合研究所

東京都小金井市貫井北町4-2-1

(22)出願日

平成13年9月10日(2001.9.10)

(72)発明者 寶迫 巖

東京都小金井市貫井北町4-2-1 独立

行政法人通信総合研究所内

(72)発明者 谷 正彦

東京都小金井市貫井北町4-2-1 独立

行政法人通信総合研究所内

(74)代理人 100082669

弁理士 福田 賢三 (外2名)

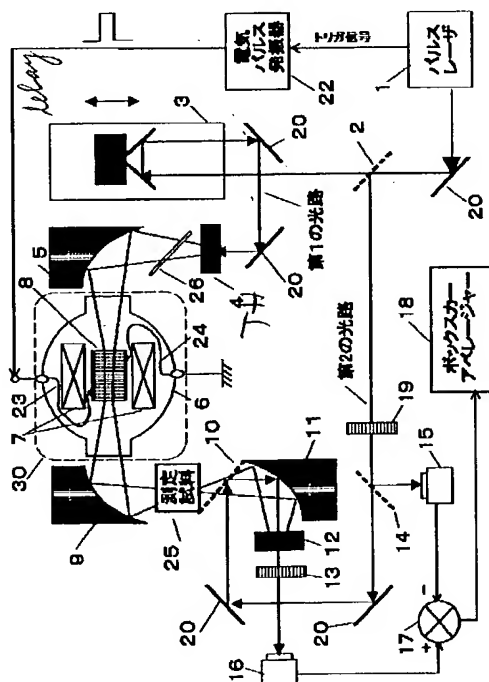
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 テラヘルツ電磁波時間分解分光装置

(57)【要約】

【課題】 測定試料に照射される、または測定試料から出射するパルス状テラヘルツ (THz) 電磁波を増幅して、信号対雑音比を改善し、従来では不可能であった飽和分光の時間分解測定を実現できるTHz電磁波時間分解分光装置を提供する。

【解決手段】 パルスレーザ光源と、その光の分岐手段と、分岐されたいずれかの光路の光を遅延させる手段と、分岐あるいは遅延された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のTHz電磁波を発生する発生手段と、発生したパルス状THz電磁波を増幅する増幅手段と、該パルス状THz電磁波に同期して前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段と、増幅されたパルス状THz電磁波を測定試料に入射する構成と、分岐あるいは遅延された第2の光路の光と上記の測定試料から出射した光とを合波する合波手段と、この光を電気信号に変換する変換手段とを有する構成とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 パルスレーザ光源と、該光源からの光を複数の光路に分岐する分岐手段と、分岐されたいずれかの光路の光を遅延させる手段と、

分岐されたあるいはさらに遅延された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する発生手段と、発生したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段と、該パルス状テラヘルツ電磁波に同期して、前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段と、増幅されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、

分岐されたあるいはさらに遅延された第2の光路の光と上記の測定試料から出射した光とを合波する合波手段と、この合波された光を電気信号に変換する変換手段と、を、有することを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項2】 パルスレーザ光源と、該光源からの光を複数の光路に分岐する分岐手段と、分岐されたいずれかの光路の光を遅延させる手段と、

分岐されたあるいはさらに遅延された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する発生手段と、発生されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段と、上記の測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波に同期して前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段と、

分岐されたあるいはさらに遅延された第2の光路の光と上記の測定試料から出射した光とを合波する合波手段と、この合波された光を電気信号に変換する変換手段と、を、有することを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項3】 請求項1あるいは2に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の構成に加えて、さらに、分岐された光路の光を遅延させる遅延手段により伝搬時間が遅らされたパルスレーザ光のビーム径を拡大する拡大手段を有し、そのビーム径を拡大された光を上記の合波手段に入射する構成を備えることを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項4】 請求項1、2あるいは3に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置において、パルスレーザ光を電気光学結晶、LT-GaAsの光スイッチ素子、高温超電導体の光スイッチ素子、半導体表面からのTHz電磁波放射を利用した素子、光パラメトリック発振によるTHz電磁波放射を利用した素子、あるいは、量子井戸からのTHz放射を利用した素子に照射してパルス状テラヘルツ電磁波を発生することを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項5】 請求項1、2、3あるいは4に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置におい

て、

パルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段は、結晶のもつ平行する2つの結晶面に一対のオーム性電極を設けたP型半導体結晶と、この電極を通してストリーミング運動が生じるに十分な電場を印加する手段と、ストリーミング運動が生じるに十分な低温にこの単結晶を冷却する冷却手段と、軽い正孔の分布が重い正孔の分布に対して反転分布を形成されるに十分な強さの、電場と直交する、磁場を半導体結晶に印加する磁気発生手段と、上記の半導体結晶にテラヘルツ電磁波を入射する入射手段と、結晶からテラヘルツ電磁波を出射する出射手段と、上記の半導体結晶内でのテラヘルツ電磁波の進行方向が磁場と直交するフォークト配置となる構成とを備えることを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項6】 請求項5に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置において、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶の光路上の端面に、テラヘルツ電磁波の反射防止膜を有することを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項7】 請求項5あるいは6に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置において、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶の光路上の端面がブリュースター角に加工されたことを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項8】 請求項5、6あるいは7に記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置において、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶に一軸性応力を印加することにより上記の反転分布状態を形成するのに必要な電場磁場の閾値を低くならしめたことを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項9】 請求項5ないし8のいずれかに記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置において、半導体結晶に印加する磁場強度を掃引して、増幅周波数を予め決められた範囲で可変としたことを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

【請求項10】 請求項5ないし9のいずれかに記載されたパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置に加えて、さらに、半導体結晶の光軸まわりに印加磁場方向を90度回転する手段と、印加電場と印加磁場、が半導体結晶内でのテラヘルツ電磁波の伝播方向に対して直交する構成を持つことを特徴とするパルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、テラヘルツ(THz)電磁波を増幅して測定試料に照射することができ、あるいは、測定試料を透過や反射したテラヘルツ電磁波を増幅して検出器に入力することができるテラヘルツ電

磁波時間分解分光装置に関するものである。

#### 【0002】

【従来の技術】従来の代表的なテラヘルツ電磁波時間分解分光装置は、図6に示す様に、パルスレーザ光を発生するパルスレーザ光源1と、発振したパルスレーザ光を分岐する分岐手段2と、分岐したパルスレーザ光の一方を用いてパルス状のテラヘルツ電磁波を発生するテラヘルツ電磁波発生手段4と、パルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、分岐手段2で分岐された他方のパルスレーザ光の伝搬距離を変化させ、伝搬時間を遅延させる遅延手段3と、パルスレーザ光を偏光させる偏光手段19と、偏光したパルスレーザ光と測定試料を通過して来たパルス状テラヘルツ電磁波とを同じ光軸上に載せる合波手段10と、合波手段10からのパルス状テラヘルツ電磁波と偏光したパルスレーザ光とを電気光学結晶12に入射させる構成と、電気光学結晶から出射したパルスレーザ光を偏光させる偏光手段13と、偏光手段13を通過したパルスレーザ光を電気信号に変換する手段16と、分岐手段2で分岐された光をさらに分岐する分岐手段14と、分岐手段14からの光を電気信号に変換する変換手段15と、変換手段16からの電気信号と変換手段16からの電気信号とを演算する信号処理手段17とを備えたものである。

#### 【0003】

【発明が解決しようとする課題】従来のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置では、発生できるパルス状テラヘルツ電磁波が数十マイクロワット以下と小さいため、被測定対物は、比較的テラヘルツ電磁波を透過させ易いプラスチックや半導体物質に限られていた。

【0004】この発明は上記に鑑み提案されたもので、測定試料に照射されるパルス状テラヘルツ電磁波の電力を最大で数ワット程度まで増幅すること、または測定試料を透過または反射したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅することにより、従来のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置より優れた信号対雑音比を達成して、測定時間の短縮を図り、あるいは、測定試料のサイズについての従来の方法での制限を緩和し、あるいは、従来のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置では不可能であったテラヘルツ電磁波による飽和分光の時間分解測定を実現することのできるテラヘルツ電磁波時間分解分光装置を提供することを目的とする。

#### 【0005】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明における第1の発明は、パルスレーザ光源と、該光源からの光を複数の光路に分岐する分岐手段と、分岐されたいずれかの光路の光を遅延させる手段と、分岐されたあるいはさらに遅延された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する発生手段と、発生したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段と、該パルス状テラヘルツ電磁

波に同期して、前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段と、増幅されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、分岐されたあるいはさらに遅延された第2の光路の光と上記の測定試料から出射した光とを合波する合波手段と、この合波された光を電気信号に変換する変換手段と、を、有することを特徴としている。

【0006】また、本発明における第2の発明は、パルス状テラヘルツ電磁波の増幅装置を測定試料の後に備えるものであり、パルスレーザ光源と、該光源からの光を複数の光路に分岐する分岐手段と、分岐されたいずれかの光路の光を遅延させる手段と、分岐されたあるいはさらに遅延された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する発生手段と、発生されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段と、上記の測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波に同期して前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段と、分岐されたあるいはさらに遅延された第2の光路の光と上記の測定試料から出射した光とを合波する合波手段と、この合波された光を電気信号に変換する変換手段と、を、有することを特徴としている。

【0007】また、本発明における第3の発明は、時間分解能を得るために第1あるいは第2の発明の構成に加えて、さらに、分岐された光路の光を遅延させる遅延手段により伝搬時間が遅らされたパルスレーザ光のビーム径を拡大する拡大手段を有し、そのビーム径を拡大された光を上記の合波手段に入射する構成を備えることを特徴としている。

【0008】また、本発明における第4の発明は、電気光学結晶を用いてパルス状テラヘルツ電磁波を発生するものであり、上記した第1、第2あるいは第3の発明の構成に加えて、パルスレーザ光を電気光学結晶、LT-GaAsの光スイッチ素子、高温超導体の光スイッチ素子、半導体表面からのTHz電磁波放射を利用した素子、光パラメトリック発振によるTHz電磁波放射を利用した素子、あるいは、量子井戸からのTHz放射を利用した素子に照射してパルス状テラヘルツ電磁波を発生することを特徴としている。

【0009】また、第5の発明は、半導体を用いてパルス状テラヘルツ電磁波を増幅するものであり、上記した第1、第2、第3あるいは第4の発明の構成において、パルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段は、結晶のもつ平行する2つの結晶面に一対のオーム性電極を設けたP型半導体結晶と、この電極を通してストリーミング運動が生じるに十分な電場を印加する手段と、ストリーミング運動が生じるに十分な低温にこの単結晶を冷却する冷却手段と、軽い正孔の分布が重い正孔の分布に対して反転分布を形成されるに十分な強さの、電場と直交

する、磁場を半導体結晶に印加する磁気発生手段と、上記の半導体結晶にテラヘルツ電磁波を入射する入射手段と、結晶からテラヘルツ電磁波を出射する出射手段と、上記の半導体結晶内でのテラヘルツ電磁波の進行方向が磁場と直交するフォークト配置となる構成とを備えることを特徴としている。

【0010】また、第6の発明は、増幅媒体への入出力への損失を抑制するものであり、上記した第5の発明の構成に加えて、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶の光路上の端面に、テラヘルツ電磁波の反射防止膜を有することを特徴としている。

【0011】また、第7の発明は、増幅媒体への入出力への損失を抑制するために、上記した第5あるいは第6の発明の構成に加えて、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶の光路上の端面がブリュースター角に加工されたことを特徴としている。

【0012】また、第8の発明は、増幅に必要な電圧を低下させるものであり、上記した第5、第6あるいは第7の発明の構成に加えて、上記の増幅手段に用いられる半導体結晶は、その結晶に一軸性応力を印加することにより上記の反転分布状態を形成するのに必要な電場磁場の閾値を低くならしめたことを特徴としている。

【0013】また、第9の発明は、広い周波数範囲で測定できるようにするために、上記した第5ないし第8のいずれかの発明の構成に加えて、半導体結晶に印加する磁場強度を掃引して、増幅周波数を予め決められた範囲で可変としたことを特徴としている。

【0014】また、第10の発明は、さらに広い周波数範囲で測定できるようにするために、上記した第5ないし第9のいずれかの発明の構成に加えて、さらに、半導体結晶の光軸まわりに印加磁場方向を90度回転する手段と、印加電場と印加磁場、が半導体結晶内でのテラヘルツ電磁波の伝播方向に対して直交する構成を持つことを特徴としている。

【0015】

【発明の実施の形態】以下にこの発明のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置で、測定が可能である事を確認するためにに行った予備実験について図2を用いて説明する。図2の装置は、テラヘルツ電磁波の半導体結晶を用いた増幅媒体8を測定試料とも見なして構成したものである。この装置は、パルスレーザ光源1と、該光源からの光を複数の光路に分岐する分岐手段2と、分岐された第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生するテラヘルツ電磁波発生手段4と、発生したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段30と、該パルス状テラヘルツ電磁波に同期して、前記増幅手段の増幅度を変化させる増幅度制御手段22と、分岐された第2の光路の光を遅延させる遅延手段3と、この遅延された光と増幅手段30を通過した光とを合波する合波手段10と、この合波された光を電気光学結晶

に入射させる集光手段11と、その電気光学結晶から出射した光を偏光させる偏光手段13と、この偏光手段13を通過した光を電気信号に変換する変換手段16と、パルスレーザ光をプローブ光として用いるために第2の光路から光を分岐する手段15と、この分岐された光を電気信号に変換する変換手段15と、変換手段15および16からの信号の差を取る信号処理手段17と、信号処理手段17からの信号の雑音を平均化する平滑器18を含む構成である。

【0016】図2で使用したテラヘルツ (THz) 電磁波の増幅手段30は、ストリーミング運動と呼ばれる波数空間における正孔の異方的な分布が形成され、電場と直交する磁場により軽い正孔の分布が重い正孔の分布に対して反転分布を形成することによる誘導放出を利用したものであり、その増幅用の半導体結晶は、P型のGe結晶で、Gaをアクセプターとして、その不純物濃度が  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  のものである。その結晶のサイズは  $3.3 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$  のファセットで、長さは  $45 \text{ mm}$  である。P型のGe結晶は液体ヘリウム温度の冷却ベッドにマウントされている。磁場Bは  $0.47 \text{ T}$  の強度で、一対の永久磁石により発生されている。また、電気バイアスパルスは、結晶の (100) 面に設けられたオーミックコンタクトにより光軸に垂直に印加される。磁場と電場は、光学軸に対して直交する関係にあり、またお互いに直角である。THz電磁波は、 $1 \text{ mm}$  厚の (110) カット ZnTe 結晶にフェムト秒レーザーを当てて発生している。この結晶は電気光学特性を有している。そのレーザー光の波長は、 $800 \text{ nm}$ 、パルス長  $100 \text{ fs}$ 、繰り返しは、 $1 \text{ kHz}$  である。また、その電気光学結晶 (ZnTe 結晶) へのレーザー光の入力パワーは、 $280 \text{ mW}$  ( $280 \mu \text{ J}$  / パルス) である。ここで、ZnTe 結晶を回転することにより、THz電磁波の偏光方向を変えることができ、それは水平に偏光され、 $3.3 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$  のファセットを持ったGe結晶に集光される。集光には、放物面鏡を用いた。その後、THz電磁波は、長さ  $45 \text{ mm}$  のP型のGe結晶を通過し、放物面鏡によって、他のZnTe結晶 (厚さ  $2 \text{ mm}$ ) に集光された。THz電磁波の電場強度は、センサーとして用いた電気光学結晶の電場によって、プローブパルスの偏光の変化として検出される。その変化は、光検出器とボックスカーアベレージャー (平滑器) を用いて測定される。THz電磁波と上記のGe結晶に印加する電気バイアスパルス ( $2 \mu \text{ s}$ 、 $16 \text{ Hz}$ ) との同期は、レーザードライバからのトリガー信号を用いてとった。

【0017】図3(a)は、電気バイアスパルスがTHz電磁波と重なった時の検出したTHz信号波形 ( $dt = 0 \mu \text{ s}$ 、実線) と電気バイアスパルスをTHz電磁波の前に  $6 \mu \text{ s}$  ずらした時の検出した信号波形 ( $dt = -6 \mu \text{ s}$ 、破線) を示しており、図3(b)は、それぞれの

波形のFFT（高速フーリエ変換）振幅スペクトルで、電気バイアスパルスがTHz電磁波と重なった時の信号波形（実線）と電気バイアスパルスがTHz電磁波と重ならない時の信号波形（破線）を示している。

【0018】この図から、電気バイアスパルスと重なったTHz電磁波は、-0.3p秒の遅延があり、その主線の振幅は、電気バイアスパルスと重なっていないTHz電磁波よりも少し大きいことが分かる。また、電気バイアスパルスと重なったTHz電磁波のスペクトル（実線）は、電気バイアスパルスと重なっていないTHz電磁波の場合と比べて、2THz近辺で増大し、1THz以下で僅かに減少している。図3（c）にバイアスを印加した時のスペクトルのバイアスを印可していないときのスペクトルに対する比を示す。その比は2THzにおけるピークでほぼ7になるが、ここでは、Gaアクセプターによる強い吸収線がある。因みに、GaのD線は図3のように2.04THzである。

【0019】これらの結果から、本発明は、テラヘルツ電磁波時間分解分光装置として動作することが分かる。

【0020】

【実施例】[第1の実施例] 図1は、テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第1の実施例を示す図である。図1に示すテラヘルツ電磁波時間分解分光装置は、パルスレーザ光源1と、該光源からの光を複数の光路に分岐するハーフミラーによる分岐手段2と、分岐された第1の光路の長さを調整して、その光を遅延させる遅延手段3と、遅延をうけた第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する電気光学結晶よりなるテラヘルツ電磁波発生手段4と、テラヘルツ電磁波を選択するフィルタ26と、発生されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段30と、上記の測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波に同期して電気パルスをTHz電磁波の半導体結晶を用いた増幅媒体8に印加することにより前記第2の増幅手段の増幅度を変化させる電気パルス発振器である増幅度制御手段22と、分岐された第2の光路の光を偏光させる偏光板でできた第1の偏光手段19と、この偏光された光と上記の増幅手段30を通過したパルス状テラヘルツ電磁波とを合波する合波手段10と、この合波された光とパルス状テラヘルツ電磁波とを電気光学結晶12に入射させる構成と、その電気光学結晶から出射した光を偏光させる偏光板でできた第2の偏光手段13と、偏光手段13を通過した光を電気信号に変換する半導体光検出器でできた第1の変換手段16と、分岐された第2の光路の光をさらに分岐するハーフミラーでできた第2の分岐手段14と、第2の分岐手段の光を電気信号に変換する半導体光検出器でできた変換手段15と、変換手段16からの電気信号と第2の変換手段からの電気信号との差分を抽出する差動増幅器でできた信号処理手段17とを備えている。信号処理手段17からの信号は、ボックスカーアベレージャー18を用いて平滑して信号対雑音比を向上させている。信号処理手段17からの信号は、また、デジタル化して信号処理することによっても信号対雑音比を向上する事ができることは、既に良く知られている。

た信号処理手段17とを備えている。また、信号処理手段17からの信号は、ボックスカーアベレージャー18を用いて信号対雑音比を向上させている。

【0021】[第2の実施例] 図4は、テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第2の実施例を示す図である。図1に示すテラヘルツ電磁波時間分解分光装置は、パルスレーザ光源1と、該光源からの光を複数の光路に分岐するハーフミラーによる分岐手段2と、分岐された第1の光路の長さを調整して、その光を遅延させる遅延手段3と、遅延をうけた第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生する電気光学結晶よりなるテラヘルツ電磁波発生手段4と、テラヘルツ電磁波を選択するフィルタ26と、発生されたパルス状テラヘルツ電磁波を測定試料に入射する構成と、測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波を放物面鏡5を用いて集光して増幅手段30によって増幅する構成と、増幅されたパルス状テラヘルツ電磁波を放物面鏡9を用いて集光する構成と、パルスレーザからのトリガ信号に同期することにより上記の測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波に同期して電気パルスをTHz電磁波の増幅媒体8に印加することにより前記第2の増幅手段の増幅度を変化させる電気パルス発振器である増幅度制御手段22と、分岐された第2の光路の光を偏光させる偏光板でできた第1の偏光手段19と、この偏光された光のビーム径を拡大する球面反射鏡であるビーム径拡大手段21と、ビーム径拡大手段21を用いてビーム径を拡大された光とパルス状テラヘルツ電磁波とを合波する合波手段10と、この合波された光とパルス状テラヘルツ電磁波とを電気光学結晶12に入射させる構成と、その電気光学結晶から出射した光を偏光させる偏光板でできた第2の偏光手段13と、偏光手段13を通過した光を電気信号に変換する半導体光検出器でできた第2の変換手段26と、分岐された第2の光路の光をさらに分岐するハーフミラーでできた第2の分岐手段14と、第2の分岐手段の光を電気信号に変換する半導体光検出器でできた変換手段15と、変換手段16からの電気信号と第2の変換手段からの電気信号との差分を抽出する差動増幅器でできた信号処理手段17とを備えている。信号処理手段17からの信号は、ボックスカーアベレージャー18を用いて平滑して信号対雑音比を向上させている。信号処理手段17からの信号は、また、デジタル化して信号処理することによっても信号対雑音比を向上する事ができることは、既に良く知られている。

【0022】ここで、増幅手段30は、クライオスタット6の内部に配置された超伝導電磁石27と、反射防止膜と電極のつけられた半導体結晶を用いた増幅媒体28とを備えている。27は、光軸の回りに回転することが可能であり、その磁場は光軸に対して垂直の成分を持っており、その成分を電流を変えることにより掃引することが可能である。また、その電極23、24は、光軸に

ついて直角の電場成分を持つことができる配置となっており、光軸と電場と磁場の関係はそれぞれ直角のフォークと配置にする事によって、増幅できる帯域を変えることができる。さらに磁場のみを光軸の回りに90度回転することによって、さらに増幅できる帯域を変えることができる。また、この増幅媒体8の光路上の端面には、多層膜による反射防止膜を付けておくことが望ましい。この反射膜の働きは、通常の光学系と同様に、入射光、出射光の損失を抑制することである。

【0023】また、増幅媒体である半導体結晶に一軸性応力を印加することにより増幅媒体8の反転分布状態を形成するに必要な電場磁場の閾値を低くできることが知られている。この際、応力を、どの方向に印加しても、その閾値を低くすることができる。このために用いる一軸性応力を印加する構成は、図には示していないが、その方法やそのための構成は既に良く知られており、容易に実現することができる。

【0024】[第3の実施例] 図5は、テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第3の実施例を示す図である。図5に示すテラヘルツ電磁波時間分解分光装置は、パルスレーザ光源1と、該光源からの光を複数の光路に分岐するハーフミラーによる分岐手段2と、第1の光路のパルスレーザ光に同期してパルス状のテラヘルツ電磁波を発生するテラヘルツ電磁波発生手段4と、テラヘルツ電磁波を選択するフィルタ26と、発生されたパルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段30と、上記の測定試料から出射したパルス状テラヘルツ電磁波に同期して電気パルスをTHz電磁波の半導体結晶を用いた増幅媒体8に印加することにより前記第2の増幅手段の増幅度を変化させる電気パルス発振器である増幅度制御手段22と、増幅されたテラヘルツ電磁波が測定試料に入射する構成と、分岐された第2の光路の長さを調整して、その光を遅延させる遅延手段3と、遅延をうけた光と上記の測定試料を通過したパルス状テラヘルツ電磁波とを合波する合波手段10と、この合波された光とパルス状テラヘルツ電磁波とを変換手段29とを備えている。また、変換手段29からの信号は、ボックスカーアベレージャー18を用いて信号対雑音比を向上させている。

【0025】ここで、テラヘルツ電磁波の発生方法としては、いくつかの既に知られた方法を用いることができる。例えば、1) LT-GaAsの光スイッチ素子を用いることができるが、これは、論文(M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai and S. Nakashima "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs" Appl. Opt., Vol. 36, No. 30, 7853-7859 (1997))に公開されている。また、2) 高温超電導体の光スイッチ素子を用いることができるが、これは、論文(M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai and S. Nakashima "Terahertz radiation from

superconducting YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> thin films excited by femtosecond optical pulses" Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 14, 2122-2124 (1996))に公開されている。また、3) 半導体表面からのTHz電磁波放射を利用した素子を用いることができるが、これは、論文((1) X.-C. Zhang and D. H. Auston, "Optoelectronic measurements of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics," J. Appl. Phys. Vol. 71, No. 1, pp. 326-338 (1992)、あるいは、N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, and Z. Liu, Appl. Phys. Lett. Vol. 84, p. 654-656 (1998))に公開されている。また、4) 光パラメトリック発振によるTHz電磁波放射を利用した素子を用いることができるが、これは、論文(Jun-ichi Shikata, Kodo Kawase, Ken-ichi Karino, Tetsuo Taniuchi, and Hiromasa Ito, "Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO<sub>3</sub> and MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, No. 4, pp. 653-661 (2000))に公開されている。また、5) 量子井戸からのTHz放射を利用した素子を用いることができるが、これは、論文(P. C. M. Planken, M. C. Nuss, I. Brener, K. W. Goossen, M. S. C. Luo, S. L. Chuang and L. Pfeiffer, Phys. Rev. Lett. Vol. 69, pp. 3800-3803 (1992)、あるいは、H. G. Roskos, M. C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D. A. B. Miller, A. M. Fox, S. Schmitt-Rink and K. Kohler, Phys. Rev. Lett. Vol. 68, pp. 2216-2219 (1992)、あるいは、I. Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss, M. S. C. Luo, S. L. Chuang, L. Pfeiffer, D. E. Leaird and A. M. Weiner, J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 11, pp. 2457-2469 (1994))に公開されている。

【0026】前記の素子は、また、変換手段29として用いることができ、第2の光路の光パルスがプローブ光となって、測定試料からの光とプローブ光とが重なった時点の光強度を検出することができる。このような検出を行うことの利点は、装置構成が簡略化されることにある。

【0027】また、上記の実施例1、実施例2、あるいは実施例3で説明したテラヘルツ電磁波時間分解分光装置では、パルス状テラヘルツ電磁波を増幅する増幅手段30の前あるいは後に測定試料を配置したが、そのどちらに測定試料を配置しても良いことは明らかである。どちらに配置するかは、試料のテラヘルツ電磁波に対する飽和特性や、信号対雑音特性を考慮して決めることが望ましい。また、必要に応じて、測定試料の前後両方に増幅手段を配置することが望ましい場合もある。

【0028】

【発明の効果】この発明は上記した構成からなるので、以下に説明するような効果を奏することができる。第1の発明では、微弱なテラヘルツ電磁波を増幅して測定試料に照射するようにしたので、その測定の信号対雑音比



が向上した。

【0029】また、第2の発明では、微弱なテラヘルツ電磁波を増幅して検出するようにしたので、その測定の信号対雑音比が向上した。

【0030】また、第3の発明では、プローブ光となる分岐されたパルスレーザ光のビーム径を拡大するようにしたので、パルス状テラヘルツ電磁波の検出に2次元検出器を用いた場合でも、全てのチャンネルにおいて、プローブ光を用いることができるようになった。

【0031】また、第4の発明では、第1、第2あるいは第3の発明において、パルスレーザ光を簡単な構成の素子に照射してパルス状テラヘルツ電磁波を発生するようにしたので、パルス状テラヘルツ電磁波時間分解分光装置を簡単な構成とすることができた。

【0032】また、第5の発明では、第1、第2、第3あるいは第4の発明の構成において、フォークと配置をもった半導体テラヘルツ増幅器を用いたので、広い帯域でテラヘルツ電磁波の増幅を行うことができるようになった。

【0033】また、第6の発明では、第5の発明の構成において、増幅媒体である半導体結晶に反射防止膜をつけたので、テラヘルツ電磁波の実効的な入力が増大し、信号対雑音比を改善する事ができた。

【0034】また、第7の発明では、第5あるいは第6の発明の構成において、増幅媒体である半導体結晶の端面をブリュースター角に加工することにより、テラヘルツ電磁波の損失を抑制できるようになった。

【0035】また、第8の発明では、第5、第6あるいは第7の発明の構成において、増幅媒体である半導体結晶に一軸性応力を印加することにより上記の反転分布状態を形成するに必要な電場磁場の閾値を低くできるようになった。

【0036】また、第9の発明では、第5ないし第8のいずれかの発明の構成において、増幅媒体である半導体結晶に印加する磁場強度を掃引するようにしたので、増幅周波数を予め決められた範囲で変えることができるようになった。

【0037】また、第10の発明では、第5ないし第9のいずれかの発明の構成において、印加電場と印加磁場、が半導体結晶内でのテラヘルツ電磁波の伝播方向に対して直交したまま、半導体結晶の光軸まわりに印加磁場方向を90度回転するようにしたので、増幅媒体である半導体結晶に一軸性応力を印加することにより上記の反転分布状態を形成するに必要な電場磁場の閾値を低くできるようになった。

【図面の簡単な説明】

【図1】テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第1の実施例を示すブロック図である。

【図2】測定が可能である事を確認するために行った予備実験のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置を示すブロック図である。

【図3】予備実験の測定結果を示す図で、(a)は、測定した信号振幅と時間との関係を示す図で、(b)は、そのフーリエ変換を示す図で、(c)は、フーリエ変換結果の電場バイアスの重なりが有る場合とない場合の比を示す図である。

【図4】テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第2の実施例を示すブロック図である。

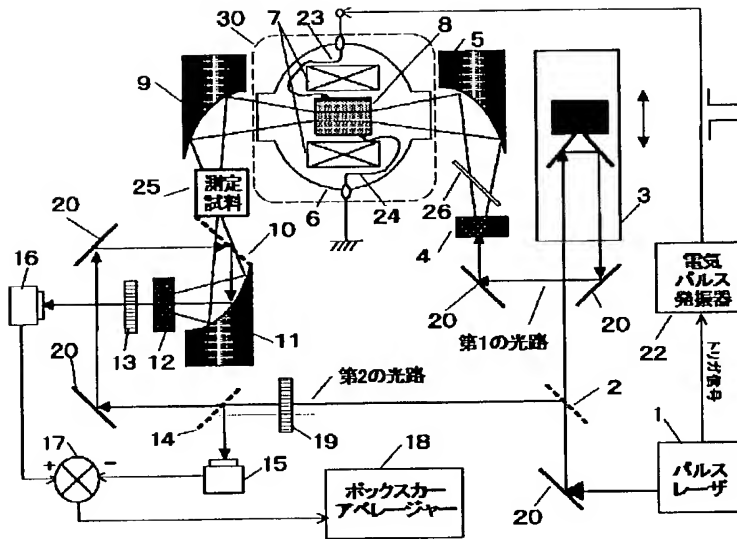
【図5】テラヘルツ電磁波時間分解分光装置の第3の実施例を示すブロック図である。

【図6】従来のテラヘルツ電磁波時間分解分光装置の代表的な構成を示すブロック図である。

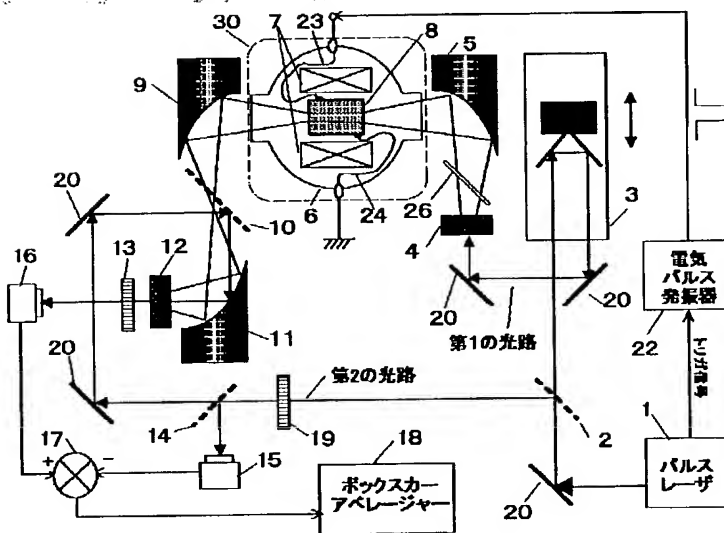
【符号の説明】

- 1 パルスレーザ光源
- 2 分岐手段
- 3 遅延手段
- 4 テラヘルツ電磁波発生手段
- 5 放物面鏡
- 6 クライオスタット
- 7 磁石
- 8 増幅媒体
- 9 入射手段
- 10 光の分岐手段
- 11 集光手段
- 12 電気光学結晶
- 13 偏光手段
- 14 分岐手段
- 15 変換手段
- 16 変換手段
- 17 信号処理手段
- 18 平滑器
- 19 偏光手段
- 20 反射手段
- 21 ビーム径拡大手段
- 22 増幅度制御手段
- 23、24 電極
- 25 測定試料
- 26 フィルタ
- 27 超伝導電磁石
- 28 増幅媒体
- 29 変換手段
- 30 増幅手段

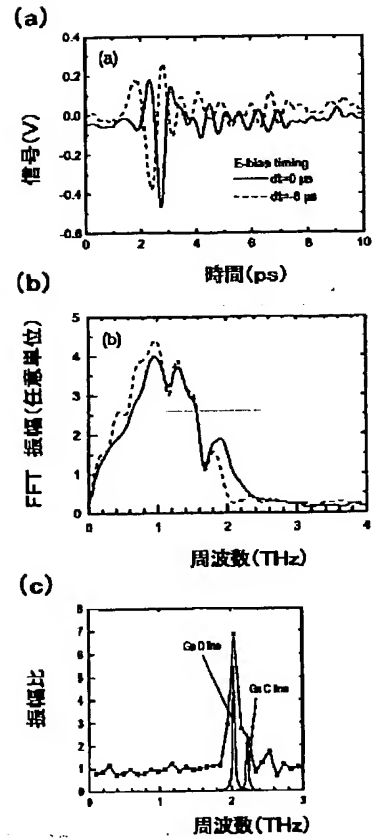
【図1】



【図2】



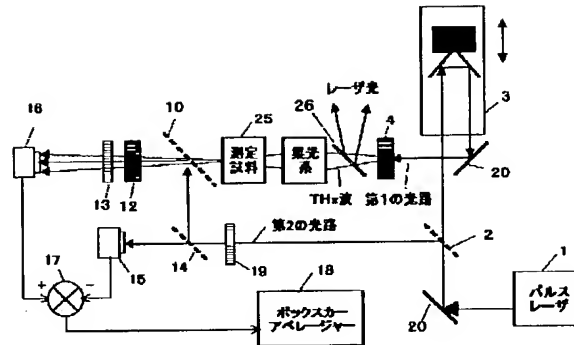
【図3】







【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 廣本 宣久  
東京都小金井市貫井北町4-2-1 独立  
行政法人通信総合研究所内

(72)発明者 渡辺 昌良  
東京都小金井市貫井北町4-2-1 独立  
行政法人通信総合研究所内

(72)発明者 阪井 清美  
東京都小金井市貫井北町4-2-1 独立  
行政法人通信総合研究所内

Fターム(参考) 2G020 AA03 CA14 CB05 CB23 CB42  
CC26 CD03 CD13 CD15 CD24  
CD35

2G059 AA05 BB08 BB16 EE01 EE02  
EE05 EE10 EE12 GG01 GG04  
GG08 HH01 HH06 JJ01 JJ02  
JJ14 JJ18 JJ19 JJ22 KK01  
MM01 MM03 MM08

2G065 AA12 AA13 AB02 AB09 AB16  
AB23 BA02 BB14 BB27 BB32  
BB39 BC05 BC15 DA08